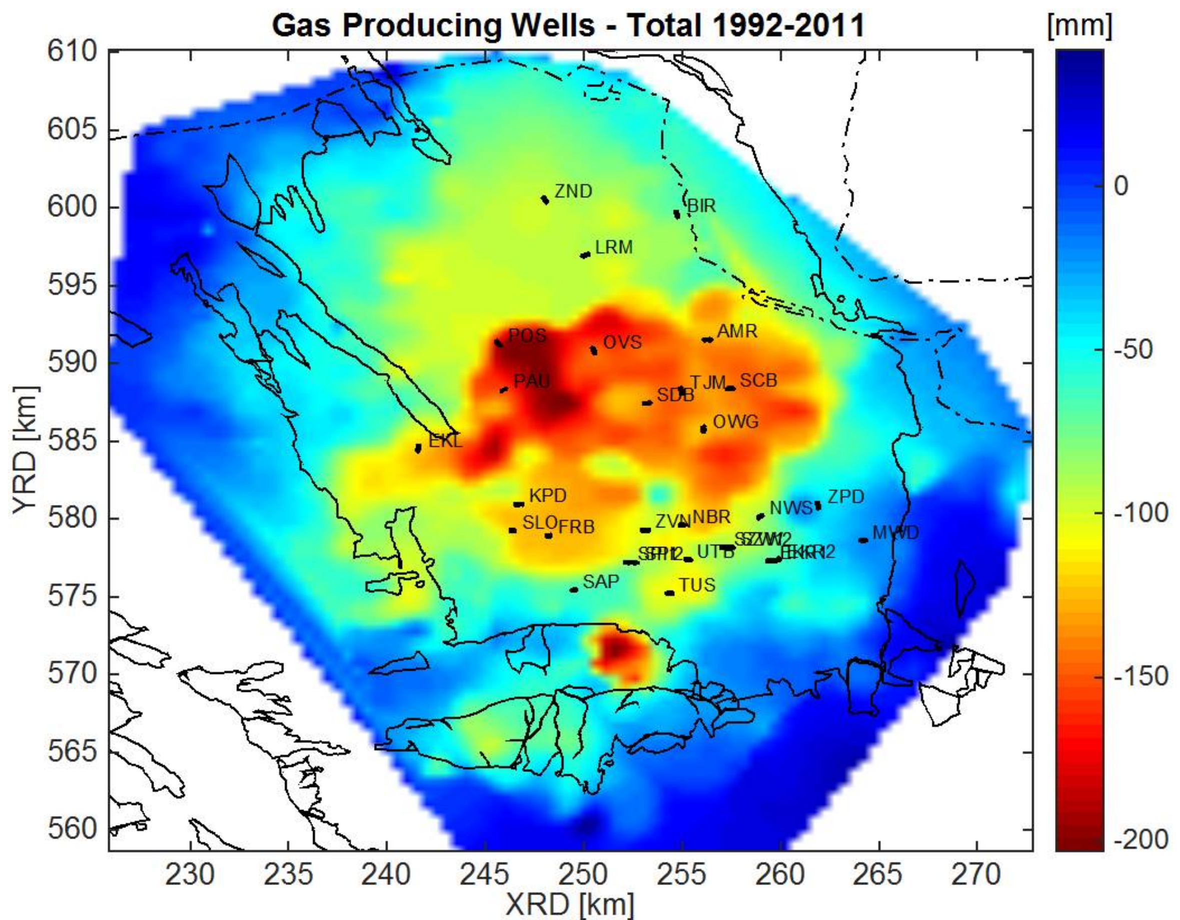
Bodemdalingsvariabiliteit uit InSAR data

Een studie naar haalbaarheid van het gebruik van 'secundair' bodemdalingssignaal en haar relatie tot aardbevingen in Groningen

R.F. Hanssen

Depr. of Geoscience and Remote Sensing



TU Delft Delft University of Technology

Challenge the future

BODEMDALINGSVARIABILITEIT UIT INSAR DATA

EEN STUDIE NAAR HAALBAARHEID VAN HET GEBRUIK VAN 'SECUNDAIR' BODEMDALINGSSIGNAAL EN HAAR RELATIE TOT AARDBEVINGEN IN GRONINGEN

by

R.F. Hanssen

Rapportage voor het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM)

Department of Geoscience and Remote Sensing
Faculty of Civil Engineering and Geosciences

Technische Universiteit Delft

Main author:	Prof. dr. ir. R.F. Hanssen	
Co-authors:	M. Arikan, MSc	TU Delft
	S. Samiei Esfahany, MSc	TU Delft
	Dr. ir. F.J. van Leijen	TU Delft

Version 1.0

R.F. Hanssen, Stevinweg 1, 2628 CN, Delft, Nederland, 015-2783662, *r.f.hanssen@tudelft.nl*.

TU Delft Delft University of Technology

VOORWOORD

Sinds de lancering van de ERS-1 satelliet in 1991 zijn datasets beschikbaar gekomen van Synthetische Apertuur Radar (SAR) vanuit de ruimte. Sinds 1995 is de TU Delft actief in het onderzoek naar de geodetische toepassingen van deze techniek. Alhoewel het geruime tijd duurde, is vanaf 2004 aangetoond dat middels Interferometrische SAR de bodembeweging boven de Groningse gasvelden te meten is, met een kwaliteit die wedijvert met de traditionele waterpassingsmetingen. Inmiddels heeft de TU Delft kaarten geproduceerd van de bodembeweging van het hele land.

Daarbij werd de bodembeweging meestal gevisualiseerd als een constante snelheid, en werden temporele variaties nauwelijks verder bekeken. Boven de Groningse gasvelden leek het er bovendien op dat met het verder onderdrukken van de ruisbronnen ook ruimtelijke variabiliteit zichtbaar werd. De vraag die hierdoor bovenkwam is of deze spatio-temporele variabiliteit mogelijk extra informatie blootlegt, die kan worden gebruikt voor verschillende doeleinden.

Deze studie is bedoeld om een gefundeerde uitspraak te doen over de haalbaarheid van dit type spatio-temporele analyses en om de mogelijke informatie die hieruit volgt bloot te leggen.

De studie is uitgevoerd bij de geodesiegroep van de afdeling Geoscience & Remote Sensing. De data-analyse en -visualisatie is uitgevoerd door Mahmut Arikan. Freek van Leijen en Sami Samiei Esfahany hebben geadviseerd in het proces.

R.F. Hanssen
Delft, mei 2015

CONTENTS

1
INTRODUCTIE

In het voorjaar van 2015 is door de afdeling Geoscience & Remote sensing een tweetal geodetische studies uitgevoerd, gerelateerd aan bodembeweging en de mogelijk relatie daarvan met geinduceerd aardbevingen in Groningen. De eerste studie focuste op de analyse van de GNSS stations, de tweede op de analyse van de InSAR resultaten.

In deze rapportage tonen we de belangrijkste resultaten van de InSAR studie.

1.1. OPZET HAALBAARHEIDSSTUDIE

De hoofdvraag van deze studie is:

> is het mogelijk om uit de spatio-temporele variabiliteit van de InSAR resultaten informatie af te leiden die gerelateerd zou kunnen zijn aan (i) spatio-temporele variabiliteit in de gaswinning, (ii) de breukenstructuur in de ondergrond, (iii) de geinduceerde aardbevingen?

Een beperking voor deze korte studie is dat slechts de haalbaarheid van het gebruik van de InSAR data voor bovengenoemd doel wordt onderzocht. Eventuele vervolgstudies kunnen zich richten op (i) de geodetisch-geofysische interpretatie, (ii) op het aanscherpen en optimaliseren van de verwerkingsmethodieken van de radar data.

1.2. WERKWIJZE

De mogelijkheid om spatio-temporele variabiliteit te onderzoeken volgt uit de kenmerken van de InSAR data. Ruimtelijk wordt het bodemdalingssignaal dicht bemonsterd door zogenaamde *persistent scatterers*, de 'meetpunten' van de radarmetingen. De bemonsteringsdichtheid is evenredig aan het voorkomen van gebouwen in het gebied: in stedelijk gebied worden enkele honderden punten per $km^2$2 aangemeten, terwijl in het landelijk gebied de dichtheid van boerderijen bepalend is. De extensie van het gebied bestrijkt het gehele gaswinningsgebied in Nederland. Temporeel bestrijken de data een periode vanaf 1992 tot medio 2014. Voor deze haalbaarheidsstudie zijn reeds verwerkte radardatasets gebruikt, er is dus niet opnieuw een interferometrische verwerking gedaan. De data zijn opgenomen met vier verschillende satellieten: ERS-1, ERS-2, Envisat, en Radarsat-2. Het temporele bemonsteringsinterval varieert tussen de 24 en de 35 dagen

1.3. KENMERKEN VAN DE INSAR DATA

Doordat de gebruikte radarreflecties afkomstig zijn van verschillende objecten, wordt niet alleen de door de gaswinning veroorzaakte bodembeweging gemeten, maar ook andere effecten, zoals instabiliteit van individuele objecten en een eventuele bewegingscomponent in de ondiepe ondergrond. Het scheiden van deze componenten is mogelijk, maar in deze haalbaarheidsstudie niet gedaan. Als gevolg hiervan bestaat er een variabiliteit in de geschatte bodembewegingsparameters, zoals bijvoorbeeld de dalingssnelheden. Deze variabiliteit moet dus meestal niet gezien worden als 'ruis' in de metingen, maar als 'niet representatieve' metingen. Desalniettemin is het zo dat door de diepe oorsprong van de daling t.g.v. gaswinning toch *alle* metingen behept zullen zijn met het gaswinnings-gerelateerde bodemdalingssignaal.

2

Gebruikte gegevens

InSAR

Radar interferometrische tijdseries van de satellieten ERS (ERS-1 en ERS-2) (1992-2000), Envisat (2004-2011), en Radarsat-2 (mid-2009 – mid 2014). De datasets zijn reeds interferometrisch verwerkt, en de resultaten hiervan vormden de input. Tenzij anders aangegeven zijn de getoonde resultaten in de line-of-sight naar de satelliet. Om een eerste indruk te krijgen van de verticale component dienen deze waarden met 10-15% te worden vermeerderd. (Hierbij wordt dan impliciet aangenomen dat er geen horizontale component van de bodembeweging is, hetgeen onjuist is)

Breuken

Gebruikte data zijn verkregen via
http://www.nlog.nl/resources/Aardbevingen%20Groningen/Technisch_rapport_Effecten%20verschillende%20productiescenario_FINAL.pdf (kaartje p.14) Breuken zijn niet digitaal ter beschikking gesteld

Putten

Gebruikte data zijn verkregen via
http://www.nlog.nl/resources/OtherMaps/NLOG_Boorgaten_ED_1950_UTM_31N_20150303.zip en
http://www.nlog.nl/resources/OtherMaps/NLOG_Boorgaten_GCS_WGS_1984_20150303.kmz

Produktiegegevens

Gebruikte data zijn verkregen via
http://www.nlog.nl/nlog/requestData/nlogp/prodfig/queryForm.jsp?menu=pro

1	”T ZANDT’	’ZND’
2	’AMSWEER’	’AMR’
3	’BIERUM’	’BIR’
4	’DE EEKER-1’	’EKR1’
5	’DE EEKER-2’	’EKR2’
6	’DE PAAUWEN’	’PAU’
7	’EEMSKANAAL’	’EKL’
8	’FROOMBOSCH’	’FRB’
9	’KOOIPOLDER’	’KPD’
10	’LEERMENS’	’LRM’
11	’MIDWOLDA’	’MWD’
12	’NIEUW-SCHEEMDA’	’NWS’
13	’NOORDBROEK’	’NBR’
14	’OUDEWEG’	’OWG’
15	’OVERSCHILD’	’OVS’
16	’SAPPEMEER’	’SAP’
17	’SCHAAPBULTEN’	’SCB’
18	’SCHEEMDERZWAAG-1’	’SZW1’
19	’SCHEEMDERZWAAG-2’	’SZW2’
20	’SIDDEBUREN’	’SDB’
21	’SLOCHTEREN’	’SLO’
22	’SPITSBERGEN-1’	’SPI1’
23	’SPITSBERGEN-2’	’SPI2’
24	’TEN POST’	’POS’
25	’TJUCHEM’	’TJM’
26	’TUSSCHENKLAPPEN’	’TUS’
27	’UITERBUREN’	’UTB’
28	’ZUIDERPOLDER’	’ZPD’
29	’ZUIDERVEEN’	’ZVN’

Table 2.1: Namen en gebruikte afkortingen van de putten

3

Resultaten ruimtelijke variabiliteit

De resultaten van de studie worden onderverdeeld in twee delen: de ruimtelijke variabiliteit en de temporele variabiliteit.

In dit hoofdstuk onderzoeken we of de ruimtelijke variabiliteit, zoals gemeten met de hoge ruimtelijke bemonstering van de InSAR data, een mogelijke correlatie kan hebben met:

1. Het patroon van breuken in en om het reservoir
2. De locatie van de winningsputten
3. De locatie van de waargenomen aardbevingen.

3.1. Relatie tot putlocaties

Fig. 3.1 toont de gecombineerde bodemdalingsschattingen van de drie satellieten ERS-1, ERS-2, en Envisat. De eerste twee hiervan bestrijken het tijdsinterval tussen 1992 en 2001. De laatste, Envisat, start in 2004 en heeft data opgenomen tot in 2011. Alle satellieten opereerden in een 35-daagse herhalingsbaan. De periode tussen 2001 en 2004 is door lineaire interpolatie opgevuld.

In eerste aanzicht is reeds duidelijk dat het bodemdalingssignaal verre van homogeen is: er lijken 'subkommen' te zijn, die gesuperponeerd het totaalbeeld opleveren.

Het is belangrijk om aan te geven dat het gebied ook de zoutwinningsgebieden van Veendam en Winschoten bestrijkt. Vooral de bodemdaling door zoutwinning bij Veendam is in veel figuren in dit rapport te zien, op RD coordinaten (252, 570).

De bodemdalingsdata zijn vergeleken met de locaties van bekende putten in het gebied, zie Tab. 2.1 en hun locatie in Fig. 3.1.

Figuur 3.1 toont dat de locatie van putten logischerwijze gecorreleerd is met de bodemdaling. In sommige gevallen is er een duidelijke link met bepaalde subkommen, in andere gevallen is dit minder het geval. Hierbij dient opgemerkt te worden dat niet alle putten continu produceerden in de geanalyseerde periode. Binnen deze haalbaarheidsstudie kan echter gesteld worden dat het verbinden van de InSAR data aan putlocaties zinvol is, aangezien er hiermee vele meetpunten beschikbaar komen die informatie verschaffen over een bepaalde put. Hierdoor kan er gemiddeld worden over meerdere meetpunten, waardoor de precisie van de schatting enorm kan worden verbeterd, tot op of onder het millimeter niveau. Tevens kan worden geanalyseerd wat de invloedssfeer van een bepaalde put is, en hoe deze in de tijd verandert.

3.2. Relatie tot seismiciteit

Figuur 3.2A toont de bodemdaling over de periode 1992-2011 (ERS-1/2 en Envisat) en Fig. 3.2B de bodemdaling over de periode 2009-2014 (Radarsat-2). De kleurenschaal is verschillend voor beide beelden. Alhoewel het totaalbeeld goed overeenkomt, zijn er verschillen te zien in de variabiliteit, hetgeen er op duidt dat productie in beide tijdsintervallen verschilde per locatie.

Gesuperponeerd op de beelden wordt de seismiciteit getoond, ook weer onderverdeeld in de twee tijdsintervallen. Hierbij is slechts de locatie van de bevingen getoond, zonder onderscheid te maken naar magnitude of temporeel geclusterde seismiciteit. Ook moet worden aangetekend dat er door het bijplaatsen van

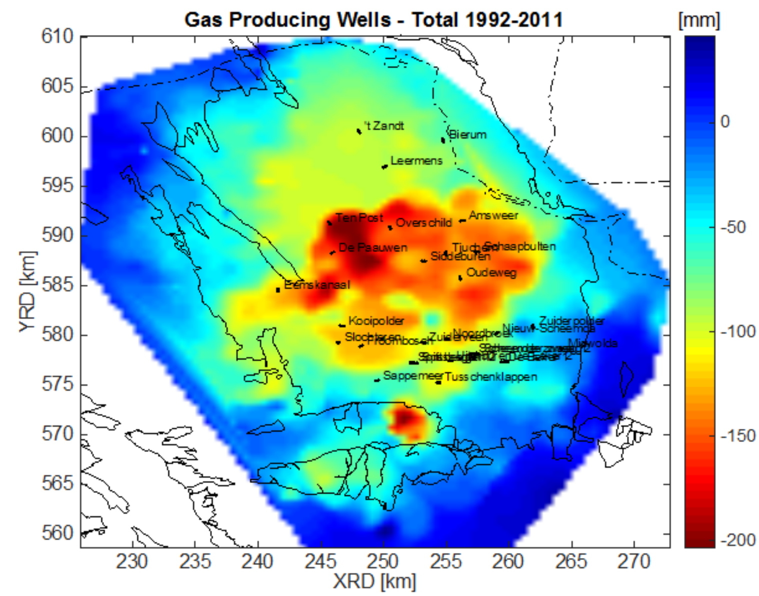


Figure 3.1: Locaties van de gebruikte putten.

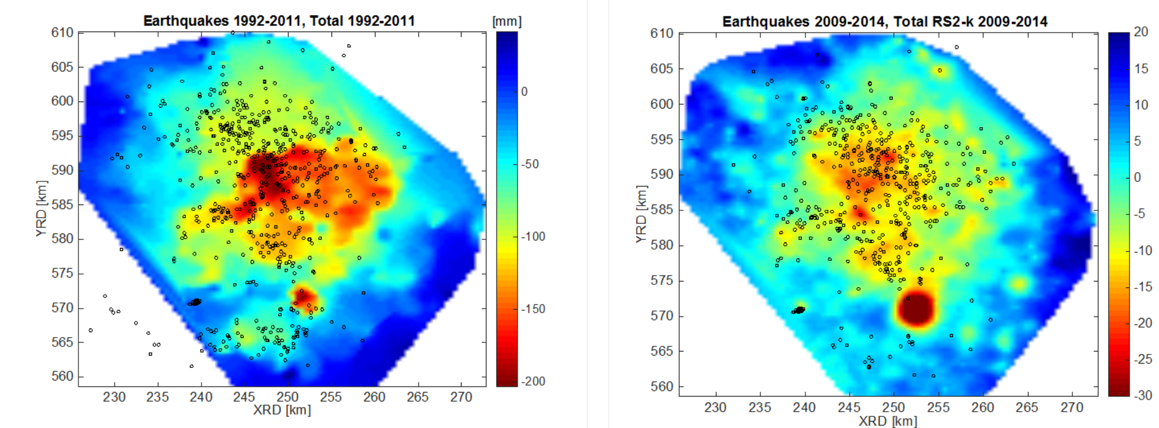


Figure 3.2: Bodemdaling in relatie tot seismiciteit. (A) Het tijdsinterval 1992-2011. (B) Het tijdsinterval 2009-2014

meer sensitieve seismische instrumentatie verschillen in het beeld kunnen ontstaan. In deze haalbaarheidsstudie is het echter voldoende om naar het totaalbeeld te kijken. Daaruit blijkt dat er een correlatie bestaat tussen clusters van seismische gebeurtenissen en de zogenaamde sub-kommen., voor verschillende periodes van cumulatieve bodemdaling.

3.3. RELATIE TOT BREUKEN

Aangezien de breuken slechts konden worden afgeleid uit een grafische afbeelding, en deze bovendien verre van compleet is, proberen we toch om een beeld te schetsen, zie Fig. 3.3. De figuur toont ook de contouren van de gasvelden (in wit), de kustlijn, de breuken, de seismiciteit en de putten. Op verschillende plekken (maar niet overal) is er een duidelijke overeenkomst te zien tussen gradienten in het de bodemdaling en de breuklocaties, o.a. bij(247,577), (240,590) en (260, 590). Wanneer de locatie van meer breuken beschikbaar is kan deze analyse worden uitgebreid.

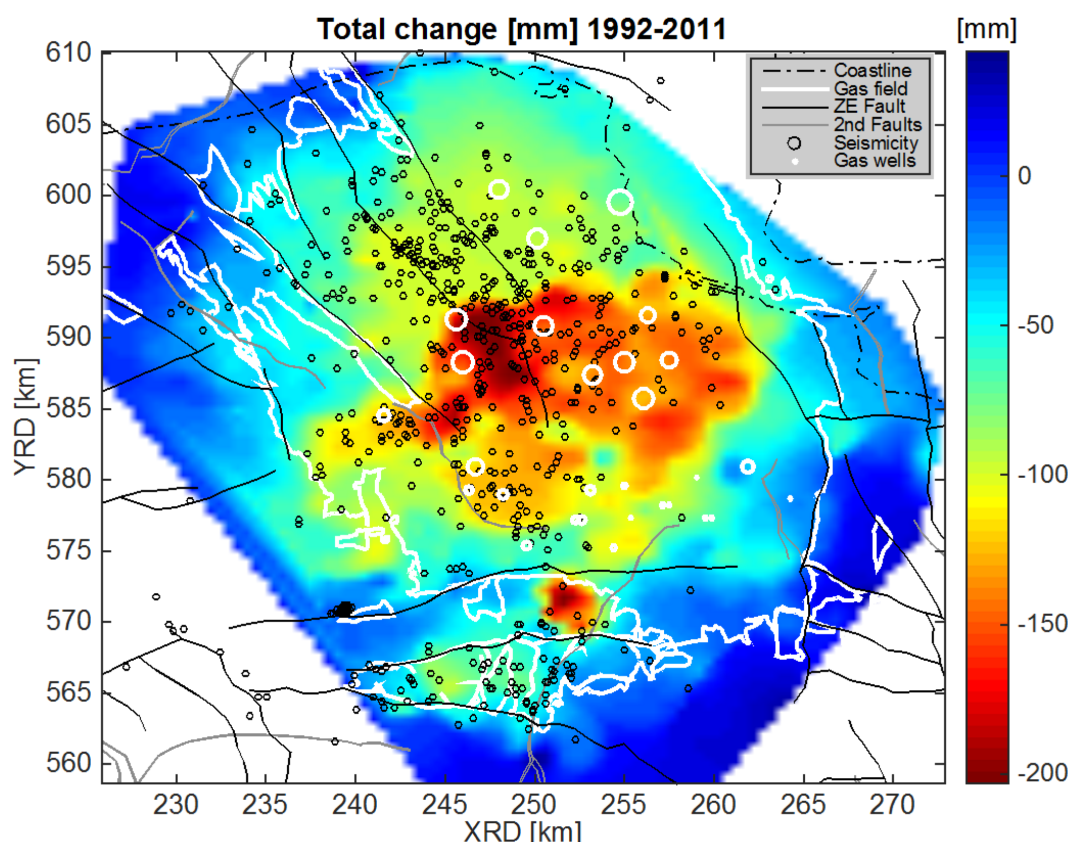


Figure 3.3: Bodemdaling in relatie tot breuken.

3.4. HET RUIMTELIJKE TWEEDE-ORDE SIGNAAL

Op drie verschillende manieren is getracht om juist de ruimtelijke variabiliteit te benadrukken. Achtereenvolgens worden getoond (i) een gradientschatting, (ii) het schatten van een eenvoudig geometrisch totaalmodel, dat wordt afgetrokken van de gemeten totaaldaling, en (iii) een ruimtelijke low-pass filtering, die wordt afgetrokken van de gemeten totaaldaling. Vervolgens wordt die herhaald voor het Radarsat-2 tijdsinterval (2009-2014).

3.4.1. GRADIENTSCHATTING

In Fig. 3.4 wordt de gradient geschat van het totale bodembewegingssignaal. Dit patroon kan gezien worden als de begrenzingslijnen van afzonderlijke subkommen, of wellicht gedeeltes van het reservoir die op verschillende wijzen depleteren, permeabiliteit van breuken, of simpelweg grote verschillen in productie per

put. In deze haalbaarheidsstudie kan in ieder geval worden gesteld dat er informatie te halen is uit het gradientsignaal.

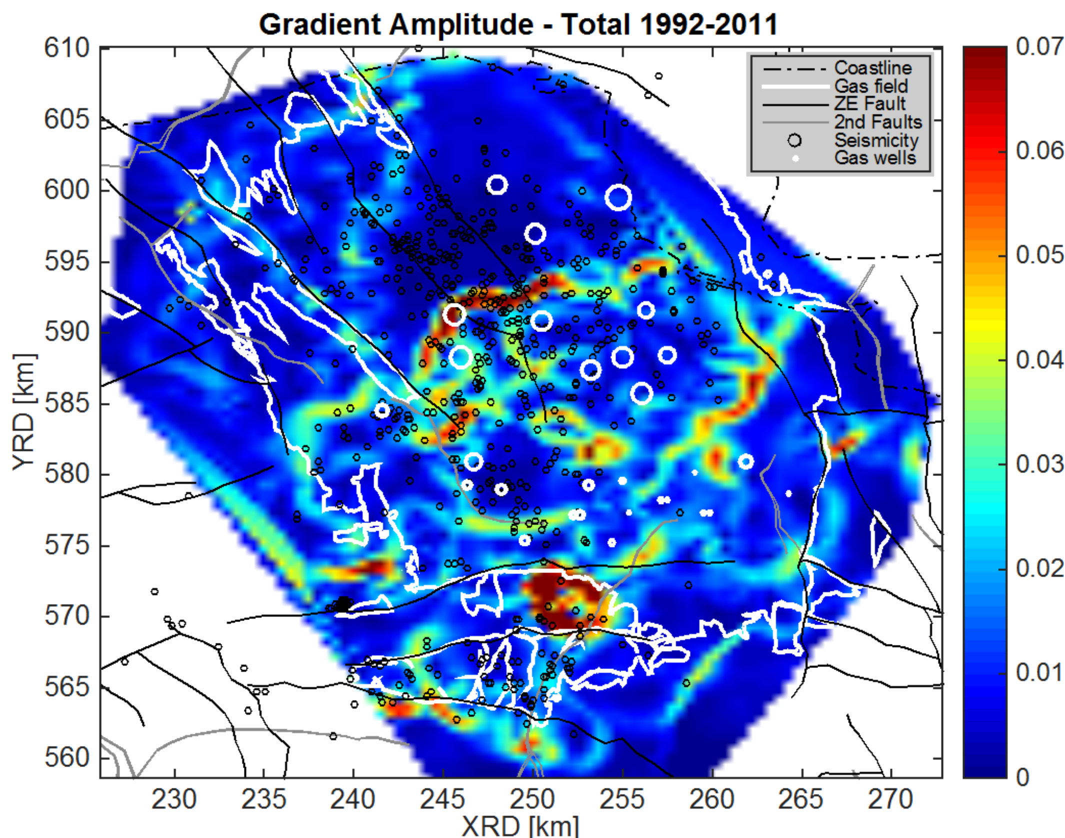


Figure 3.4: Bodemdalingsgradient verkregen door de maximale gradient te berekenen per locatie, met Fig. 3.3 als input.

3.4.2. MODELSCHATTING

Figuur 3.5 toont een aanpak waarbij er een eenvoudig geometrisch eerste-orde model uit de data geschat wordt. Dit model is in het linkerfiguur aangegeven. Het rechterfiguur is het verschil tussen de geschatte totaaldaling en het model. Alhoewel op grove schaal vergelijkbaar met het gradientresultaat in Fig. 3.4 toont dit tweede orde signaal in hoeverre de verschillende subkommen overeenkomen qua magnitude. Hierdoor worden de totale subkommen vergelijkbaar.

3.4.3. LOW-PASS FILTERING

Via een low-pass filter (kernel van 10 × 10 km) vinden we een vergelijkbaar tweede orde signaal als door de modelschatting, zie Fig. 3.5. Het residusignaal is signficant en lijkt informatie te bevatten over het volumetrisch gedrag op reservoir diepte.

3.4.4. SYNTHESE

De drie geteste methoden om een tweede-orde signaal te schatten uit de InSAR data geven min of meer verschillende resultaten, echter alle drie voegen ze informatie toe op de traditionele totaalbeweging. Er lijkt sprake te zijn van compartimentering en/of sub-kommen, die gerelateerd zijn aan de breuken, putlocaties, en seismiciteit.

3.4.5. TOTALE DALING 2009-2014

Ook voor het tijdsinterval 2009-2014 is de bodembeweging geschat, zie Fig. 3.7. De data zijn geïnterpoleerd via Kriging. Het beeld bestrijkt een korter tijdsinterval, 5 jaar, en heeft daardoor een kleiner signaal. In vergeli-

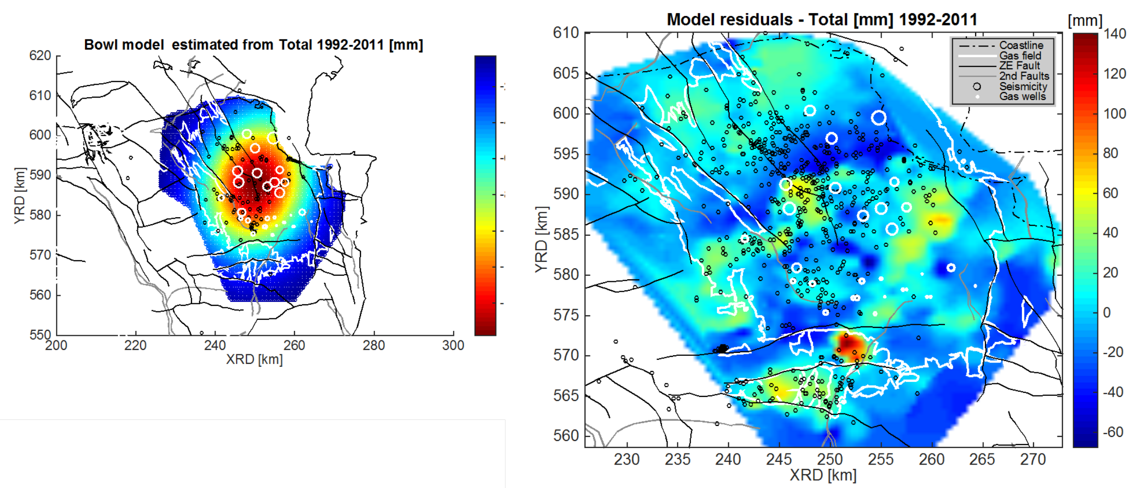


Figure 3.5: Bodemdalingsgradient verkregen door een geometrisch (ellipsoidische kom) te schatten door de data van Fig. 3.3. (A) Het geschatte model. (B) Het residu signaal dat ontstaat door het model van de waargenomen daling af te trekken.

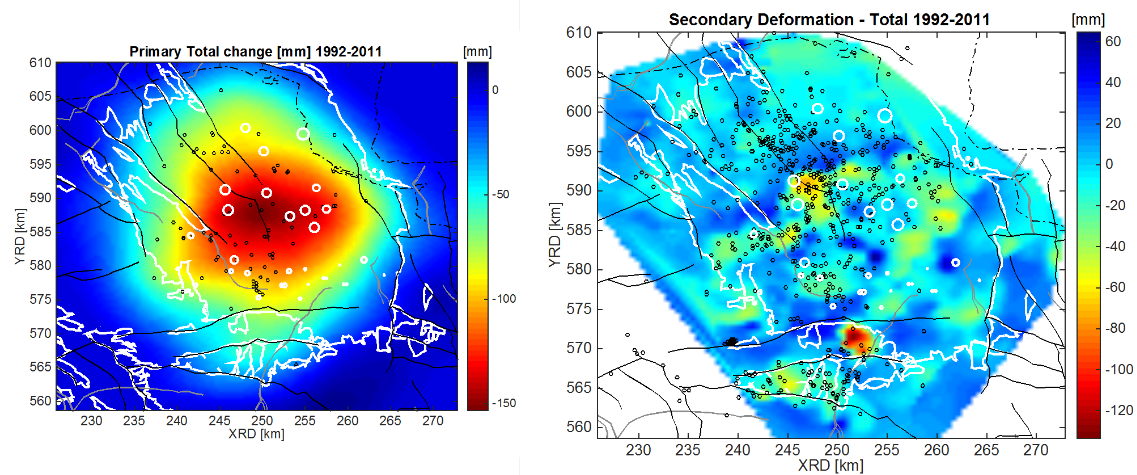


Figure 3.6: Bodemdalingsgradient verkregen door een low-pass filtering uit te voeren op de data van Fig. 3.3.

jking met Fig. 3.3 lijkt de 'hoofdkom' iets verder naar het noorden te zijn verplaatst, hetgeen gecorreleerd is met het voorkomen van de wat zwaardere seismiciteit in dit tijdsinterval. Alle figuren in dit rapport representeren, zoals eerder aangegeven, beweging in de line-of-sight tussen de satelliet en het aardoppervlak.

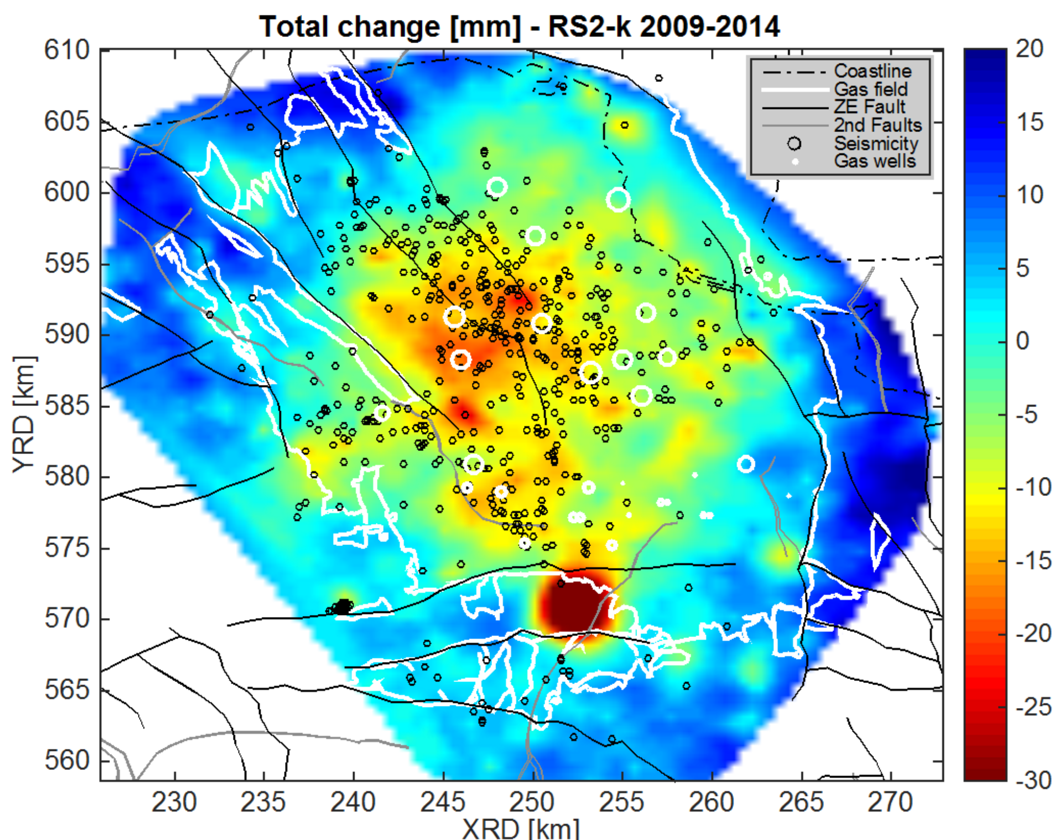


Figure 3.7: Totale cumulatieve bodembeweging (in de line-of-sight) in het tijdsinterval 2009-2014 (Radarsat-2).

3.4.6. GRADIENTSCHATTING 2009-2014

In Fig. 3.8 wordt de gradient geschat van het totale bodembewegingssignaal. Dit patroon kan gezien worden als de begrenzingslijnen van afzonderlijke subkommen, of wellicht gedeeltes van het reservoir die op verschillende wijzen depleteren, permeabiliteit van breuken, of simpelweg grote verschillen in productie per put. Doordat het tijdsinterval korter is, en de signaal-ruisverhouding hierdoor minder gunstig is, is het beeld minder duidelijk dan dat van Fig. 3.4. Toch kan ook hier worden gesteld dat er informatie te halen is uit het gradientsignaal.

3.4.7. MODELSCHATTING 2009-2014

Figuur 3.9 toont een aanpak waarbij er een eenvoudig geometrisch eerste-orde model uit de data geschat wordt. Dit model is in het linkerfiguur aangegeven. Het rechterfiguur is het verschil tussen de geschatte totaaldaling en het model. Alhoewel op grove schaal vergelijkbaar met het gradientresultaat in Fig. 3.8 toont dit tweede orde signaal in hoeverre de verschillende subkommen overeenkomen qua magnitude. Hierdoor worden de totale subkommen vergelijkbaar.

3.4.8. LOW-PASS FILTERING 2009-2014

Via een low-pass filter (kernel van 10 × 10 km) vinden we een vergelijkbaar tweede orde signaal als door de modelschatting, zie Fig. 3.9. Het residusignaal is signficant en lijkt informatie te bevatten over het volumetrisch gedrag op reservoir diepte.

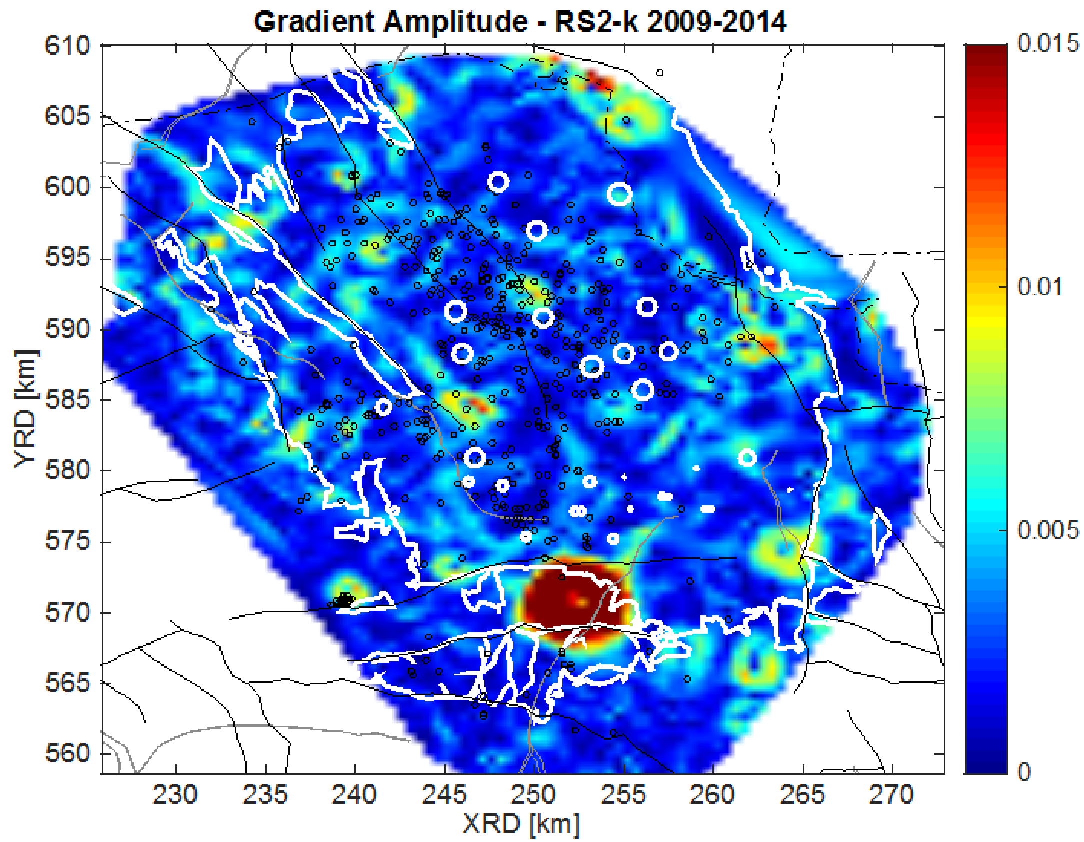


Figure 3.8: Bodemdalingsgradient 2009-2014 verkregen door de maximale gradient te berekenen per locatie, met Fig. 3.7 als input.

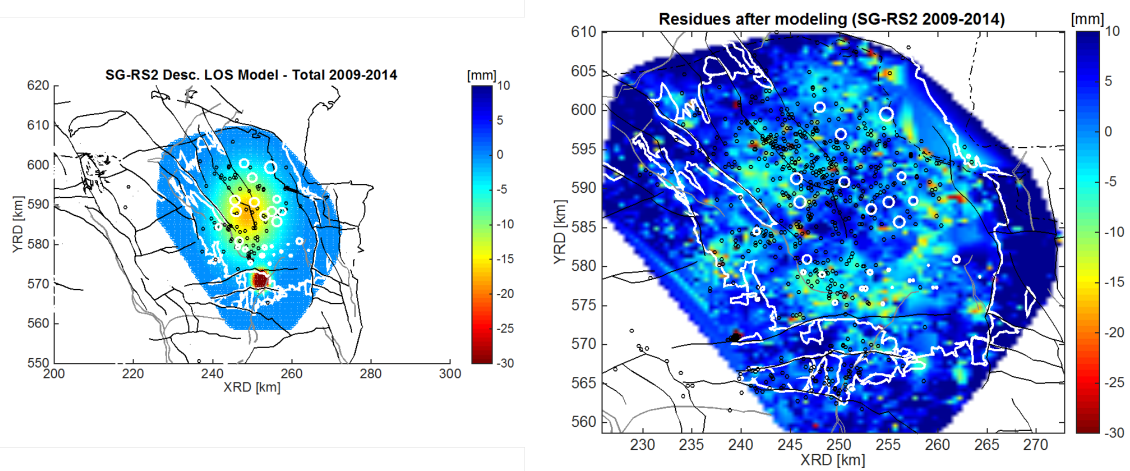


Figure 3.9: Bodemdalingsgradient 2009-2014 verkregen door een geometrisch (ellipsoidische kom) te schatten door de data van Fig. 3.7. (A) Het geschatte model. (B) Het residu signaal dat ontstaat door het model van de waargenomen daling af te trekken.

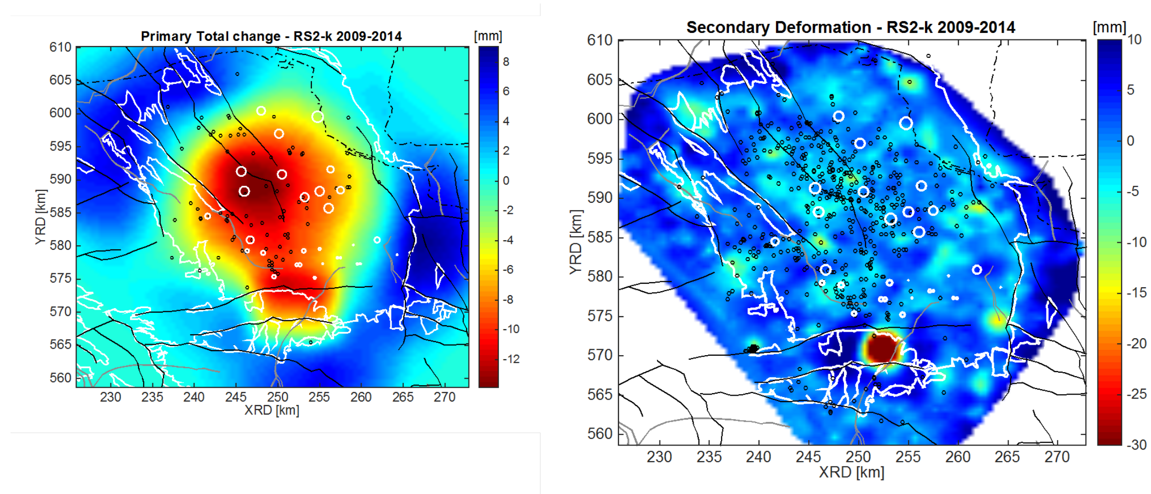


Figure 3.10: Bodemdalingsgradient 2009-2014 verkregen door een low-pass filtering uit te voeren op de data van Fig. 3.7.

3.4.9. SYNTHESE 2009-2014

Uit de analyse van de periode 2009-2014 blijkt dat het kortere tijdsinterval voor een minder helder beeld zorgt dan de bijna 20-jaar aan data van ERS-1/2 en Envisat. Echter, er zijn verschillende keuzes mogelijk om ruis verder te onderdrukken en hiermee het tweede-orde signaal versterkt naar voren te laten komen. In deze haalbaarheidsstudie is hierbinnen niet geoptimaliseerd.

3.4.10. CONCLUSIES RUIMTELIJKE VARIABILITEIT

Uit deze ruimtelijke analyses kan het volgende worden geconcludeerd.

1. Het 'tweede-orde signaal' heeft duidelijk meerwaarde bij een meer gedetaileerde analyse van de bodemdaling.
2. De overeenkomst met de breuken lijkt sterk te zijn. Doordat de auteurs geen toegang hadden tot de meer gedetailleerde breuken-database kon dit niet in meer detail onderzocht worden.
3. De match tussen de put-locaties en de centra van de sub-kommen is aanwezig, maar minder sterk dan verwacht. Blijkbaar is de maximale bodemdaling niet recht onder de put. (Zelfs wanneer de putlocaties aan het oppervlak niet de winningspunten op diepte zijn)
4. Er is een match tussen de locatie van de aardbevingswolk, maar minder sterk tussen de individuele aardbevingen en de sub-kommen.
5. De verschillende verwerkingswijzen (gradienten, 1e-orde modellen, en low-pass filtering) hebben hun eigen karakteristieken, maar geven een duidelijke meerwaarde

3.4.11. AANBEVELINGEN RUIMTELIJKE VARIABILITEIT

1. Voer een nieuwe InSAR dataverwerking uit, gebruik makend van recentere data
2. Vergelijk de variabiliteit met de uitgebreide database van breuken.
3. Stuur de verwerkingstechniek om gradienten te bepalen met kennis van de reservoirs
4. Neem de kennis van de reservoirlocaties mee, waardoor de bodemdalingsschattingen een veel hogere kwaliteit kunnen krijgen!
5. Voer de analyse uit gestuurd door de winningstermijnen, in plaats van gedreven door de tijdsduur van satelliet-missies
6. Vergelijk de variabiliteit uit InSAR met die uit waterpassingen
7. Bepaal de representativiteit van de bodemdalingsschattingen uit InSAR

4

RESULTATEN TEMPORELE VARIABILITEIT

In dit hoofdstuk onderzoeken we of de temporele variabiliteit, zoals gemeten met 24-35 daagse bemonstering van de InSAR data, een mogelijke correlatie kan hebben met (i) variabiliteit in de productievolumes of (ii) voorkomens van aardbevingen.

Ui Fig. 4.1A blijkt dat de seismiciteit toeneemt sinds 1990. Dit leidde tot de aardbevingen die de aanleiding zijn voor extra zorg. Als gevolg hiervan is voor een vijftal putten de productie behoorlijk verminderd, zie Fig. 4.1B. De locaties van deze vijf putten is aangegeven in Fig. 4.1C.

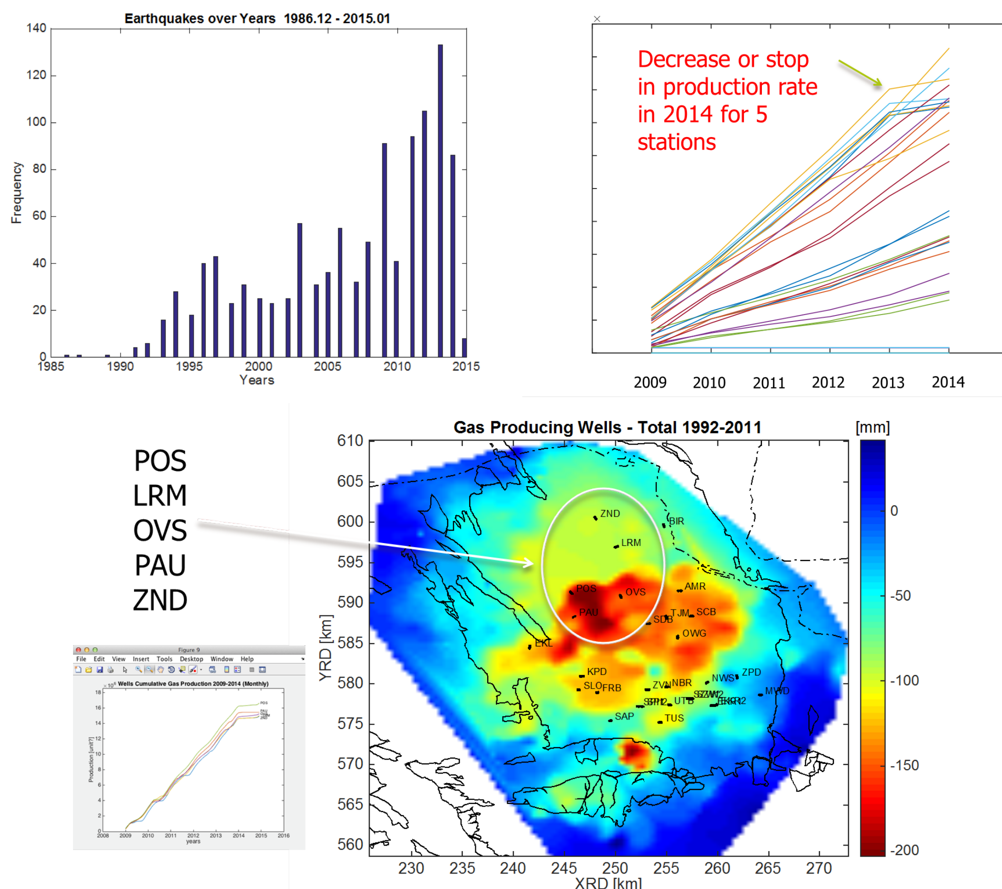


Figure 4.1: (A) Seismiciteit per jaar tussen 1986 en 2015, ongeacht de sterkte. (B) Cumulatieve gasproductie per put. Door de aardbevingen is voor vijf putten de productie significant verminderd.

Hieronder onderzoeken we of temporele variabiliteit in de productievolumes zichtbaar zijn in de tijd-

series van de bodembeweging.

4.1. TIJDSERIES 2009-2014

In de volgende figuren is de cumulatieve productie geplot naast de cumulatieve bodembeweging (line-of-sight). Daarbij is bodemdaling geplot als positieve waarden om een visuele vergelijking makkelijker te maken. De bodembewegingstijdseries zijn de gemiddelde waarden per epoche van alle PS punten binnen een cirkel met een straal van 1 km rond de locatie van de put.

Figuur 4.2 toont een viertal putten (Amsweer, Zuiderveen, De Eeker-2, en Schaapbulten) die gewoon zijn blijven doorproduceren. Voor alle vier de putten is goed zichtbaar dat de temporele variabiliteit in de productie overeenkomt met de temporele variaties in de bodemdaling. Er lijkt slechts een zeer beperkte tijdsvertraging te zijn tussen de (seizoensgebonden) productievariaties en de bodemdalingsvariaties. Opgemerkt wordt

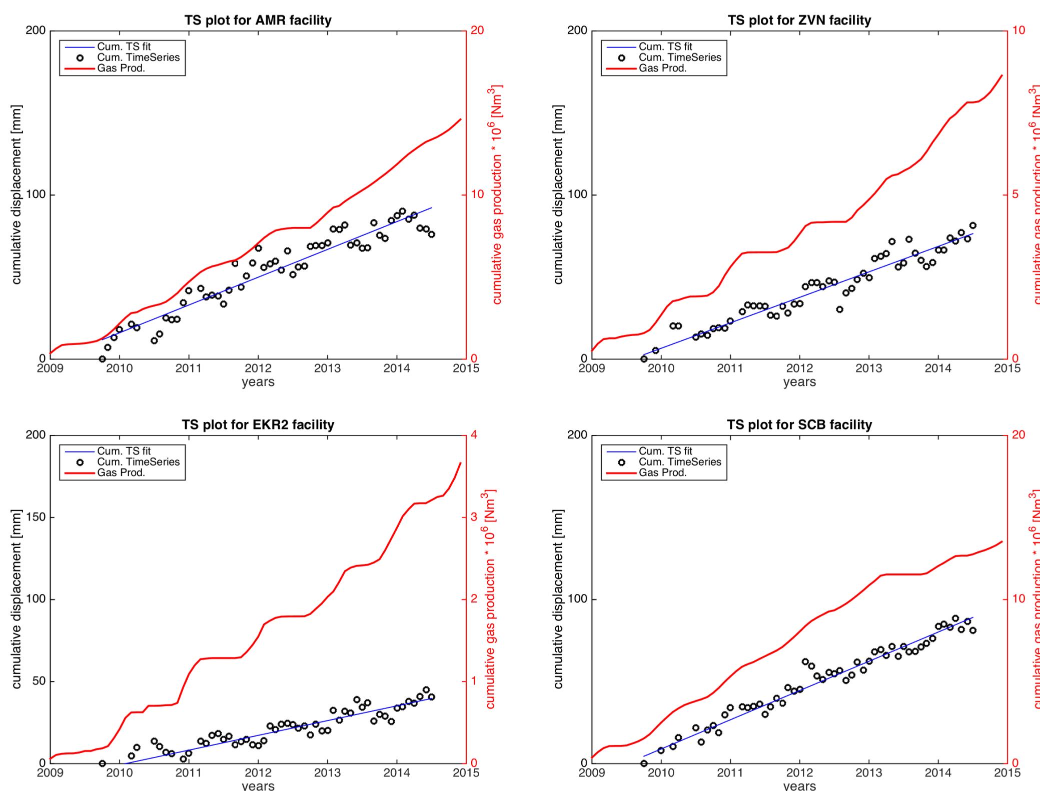


Figure 4.2: Cumulatieve gasproductie en cumulatieve bodemdaling (line-of-sight) voor de gasproductieputten Amsweer, Zuiderveen, De Eeker-2, en Schaapbulten

dat de totale productie nogal verschilt per put, hetgeen blijkt uit de rechter-verticale assen van de plots (in rood); de putten met een lagere productie (EKR2 en ZVN) hebben minder cumulatieve productie (de assen rijken tot 4 en 10 eenheden, respectievelijk). Hierdoor is de seizoensvariabiliteit ook beter zichtbaar dan bij AMR en SCB, waar de assen tot 20 eenheden rijken.

In Fig. 4.3 worden vier andere putten (Overschild, Ten Post, Leermens en De Paauwen) getoond die nagenoeg gestopt zijn met productie vanaf begin 2014. Doordat de totale cumulatieve productie groot is (de verticale assen rijken allemaal tot 20 eenheden), is de seizoensvariabiliteit minder goed zichtbaar, echter wel aanwezig. Deze seizoensvariatie wordt goed opgepakt uit de bodembewegingsgegevens. minder volgens deze productielijnen. De radaracquisities gebruikt voor deze analyse rijken tot het late voorjaar van 2014. Hierdoor is de reductie van de bodemdalingssnelheid nog niet zeer goed waar te nemen: de variabiliteit in de data kan ook nog als ruis worden gezien. Echter, alle data lijken een afzwakking van de daling te laten zien, hetgeen blijkt uit de negatieve afwijking ten opzichte van de blauwe regressielijn. Het lijkt erg waarschijnlijk dat het effect van de reductie van de gasproductie vrij snel zichtbaar is in de bodemdaling. Een analyse van de inmiddels beschikbaar gekomen radaracqusities kan dit ophelderen.

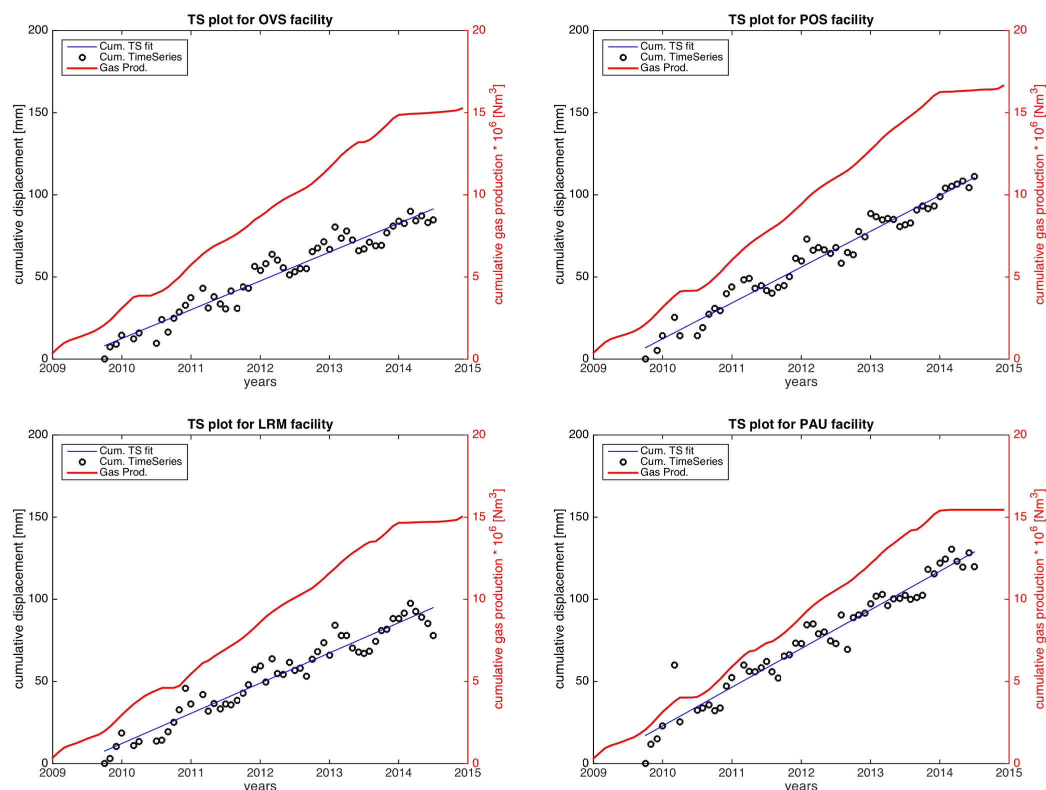


Figure 4.3: Cumulatieve gasproductie en cumulatieve bodemdaling (line-of-sight) voor de gasproductieputten Overschild, Ten Post, Leermens en De Paauwen. Deze putten hebben gemeen dat ze allen een zeer sterk gereduceerde productie hebben sinds begin 2014.

4.2. CONCLUSIES TEMPORELE VARIABILITEIT

Uit deze temporele analyses kan het volgende worden geconcludeerd.

1. De waargenomen seizoensgerelateerde bodembeweging lijkt in de meeste gevallen overeen te komen met de variabiliteit in gasproductie

2. Dit is opmerkelijk, omdat het er op lijkt dat er geen (of weinig) *time delay* is tussen de productie-swing en de daling

3. De beperking van de gasproductie in vijf velden is nog niet oonomstotelijk (significant) te detecteren uit de tijdserie. Dit wordt veroorzaakt door het beperkte aantal beelden dat in deze analyse is gebruikt nadat de productiebeperking werd doorgevoerd, in combinatie met de inherente ruis in de data.

4. Echter, de aangetoonde gevoeligheid voor de seizoens-swing maakt het aannemelijk dat deze beperking wel gemeten kan worden wanneer de nieuwe InSAR data in de analyse meegenomen waren.

5. Deze analyse maakt het ook aannemelijk te concluderen dat de beperking in de gaswinning bij de vijf stations nagenoeg instantaan heeft geleid tot een sterke beperking van de bodemdaling

6. Gegeven de vraagstelling van deze haalbaarheidsstudie kan geconcludeerd worden dat er veel meer informatie in de InSAR tijdseries zit, dan alleen met een dalingssnelheid kan worden weergegeven. De data tonen aan dat variabiliteit in productie een vrij snelle en directe vertaling heeft in de bodemdaling.

7. Deze haalbaarheids-conclusies kunnen worden getrokken bij een vrij standaard (conventionele) dataverwerkingsmethodiek. Een aanscherping daarvan zal tot betere resultaten leiden (o.a. minder ruis in de tijdseries, en een beter te bepalen moment van versnelling/vertraging in de bodemdaling

4.3. Aanbevelingen temporele variabiliteit

1. Door de match tussen bodembeweging en productie-swing, kan de tijdsvertraging in principe zeer nauwkeurig (per veld/put) worden gemeten. Dit kan zeer waardevol zijn voor de karakterisatie van reservoir en overburden. (zie Waddenacademie-studie)

2. Voer een vervolgproject/studie uit om de tijdsafhankelijke variabiliteitsschatting verder te verbeteren (verwerkingsmethodiek)

3. Koppel de methode aan de onlangs ontwikkelde model-keuze selectie aanpak (Chang and Hanssen, 2015) om automatisch bepaald temporeel gedrag te detecteren.

4. Voer een studie uit naar de link tussen de aardbevingen en de temporele variabiliteit.

5. Link de twee geodetische studies zoals uitgevoerd door TUD-GRS, t.w. de GNSS analyse en de InSAR analyse

5

CONCLUSIES

De hoofdvraag van deze studie werd in Hoofdstuk 1 beschreven als:

> is het mogelijk om uit de spatio-temporele variabiliteit van de InSAR resultaten informatie af te leiden die gerelateerd zou kunnen zijn aan (i) spatio-temporele variabiliteit in de gaswinning, (ii) de breukenstructuur in de ondergrond, (iii) de geinduceerde aardbevingen?

Het antwoord op deze vraag is dat het is haalbaar en gewenst is om informatie te winnen uit zowel de ruimtelijke variabiliteit als de temporele variatie van het door InSAR gemeten bodemdalingssignaal. Relaties met (i) de spatio-temporele variabiliteit van de gaswinning en (ii) de breukenstructuur zijn aangetoond. Relaties met de aardbevingen zijn slechts op grovere ruimtelijke schaal te zien. Temporele relaties met de aardbevingen zijn nog niet aangetoond, hiervoor is aanvullend onderzoek nodig.